

# 論文審査の結果の要旨

氏名 内島 健一郎

本論文は「Experimental Verification and Numerical Analysis on the Excitation and Propagation of Electron Bernstein Waves in the Internal Coil Torus Plasmas (内部導体型トーラスプラズマにおける電子バーンスタイン波の励起・伝搬に関する実験的検証と数値解析)」と題し、8章からなっている。

第1章は序論であり、研究の背景と目的が述べられている。近年、核融合炉心プラズマでの高温・高密度プラズマの生成法として電子バーンスタイン波(EBW)による加熱が注目されている。本研究では、本研究が対象とするダイポール磁場配位での EBW の励起・伝搬の直接的な計測と数値解析を元にして、EBW の伝搬特性とその励起条件について現在知られている3つの方法で実証することを目的としている。

第2章はプラズマ中の波について概観し、電磁波モードから EBW へのモード変換の手法として高域混成共鳴層(UHR)への近接性について解説している。現在知られている EBW への変換手法はⅠ)弱磁場からの X 波垂直入射、Ⅱ)弱磁場からの O 波斜め入射、Ⅲ)強磁場からの X 波垂直入射の3つであり、効率のよい変換が可能となる条件とその変換効率について解説している。

第3章では本研究の対象としているダイポール磁場配位と、実験に用いられた内部導体装置 Mini-RT について述べている。高温超伝導線材で製作された内部導体装置のコンセプトとプラズマ閉じ込めのための磁場配位、およびプラズマ生成システムについて概説している。

第4章は Mini-RT における波動伝搬の数値解析について述べられている。ここでは幾何光学近似を用いた光線追跡法と、マクスウェル方程式を直接的に解く有限差分時間領域(FDTD)法で解析している。光線追跡法では UHR で EBW に変換され共鳴層に吸収されるまでの光線経路を解析し、斜め入射された O 波から EBW 励起が可能となる条件を求めている。FDTD 法では、冷たいプラズマモデルを利用した解析を行い、Mini-RT 内での2次元的な X 波の伝搬パターンと共鳴層付近での波長の変化の時間発展を示している。また、プラズマの熱的効果を取り入れた計算を行い、1次元モデルでの弱磁場 X 波入射によるモード変換の様子が得られており、FDTD 法による EBW 解析の有効性を示している。

第5章はプラズマ中の波の伝搬を直接計測するための診断システムについて述べられている。電磁場計測のために設置された複数の種類のアンテナについて紹介すると共に、EBW を励起する3つの異なる方法に対する励振アンテナについて述べられている。

第6章はプラズマ中の波の伝搬特性について、3つの励起方法ごとに測定結果をまとめられている。弱磁場からの X 波垂直入射では、急峻な密度勾配を有するプラズマを形

成することにより、遮断密度を超えるオーバードレンス領域に短波長モードが観測され、この短波長モードと EBW の特徴が一致していることが示されている。次に、弱磁場からの O 波斜め入射においては、ある特定の入射角に限り同様の短波長モードが励起されることが観測され、O-X 変換による UHR への波の近接性が示されている。強磁場からの X 波垂直入射においては、遮断層が現れない範囲でプラズマを生成することによって UHR への X 波の到達が可能になり、短波長モードが励起されていることが示されている。3 つ全ての手法において EBW の特徴を示すモードが確認され、その励起条件についても理論的に予測されるプラズマパラメータの範囲であることが示されている。

第 7 章は考察にあてられている。短波長モードの屈折率は分散関係から予測される屈折率よりも 1 桁程度小さな値をとっており、理論とのずれがある。また実験的には、プローブによるエネルギー分布関数の計測で、数 eV のバルク電子に加えて、数十 eV の高エネルギー成分の存在が示されており、高エネルギー電子の屈折率への影響について検討されている。

第 8 章はまとめにあてられている。

本論文は、近年、超高密度プラズマへの加熱手法として着目されている EBW の励起・伝搬について直接計測したものであり、高  $\beta$  プラズマによる先進核融合炉を目指す内部導体装置において、現在知られている全ての手法で EBW の特徴を有する波動の励起が確認されている。ここでの知見は先端エネルギー工学、特に核融合プラズマ工学に貢献するところが大きい。

本論文の第 3 章から第 7 章は、小川雄一氏、三戸利行氏、柳長門氏、森川惇二氏、谷塚英一氏、金城清猛氏、本田章浩氏、岡部圭悟氏、牧野航氏、保坂友一朗氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。

以上 1 8 3 5 字